

DISPOSITIVOS AUTÓNOMOS PARA EL SENSADO INALÁMBRICO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS

AUTONOMOUS DEVICES FOR WIRELESS SENSING OF AGRICULTURAL MACHINES

Sebastián Machado^{a,b} y Mariano Febbo^{b,c}

^a Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Universidad Tecnológica Nacional,
Facultad Regional Bahía Blanca (CIC), 11 de Abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina,
smachado@frbb.utn.edu.ar, <http://www.frbb.utn.edu.ar>

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

^c Instituto de Física del Sur (IFISUR), Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur
(UNS), Avda. Alem 1253, B8000CPB- Bahía Blanca, Argentina, mfebbo@uns.edu.ar,
<http://www.uns.edu.ar>

Palabras Clave: Sensor de llama, recolector de energía piezoeléctrico, PZT-5J.

Resumen. En este trabajo se presenta un recolector de energía piezoeléctrico para una unidad de sensado autónomo de fuego. El diseño del mismo se basa en un nuevo material piezoeléctrico PZT-5J. Esta variante de cerámica piezoeléctrica generalmente se caracteriza por tener una alta constante dieléctrica y un alto coeficiente piezoeléctrico. Esto significa que es capaz de generar altas tensiones de salida en respuesta a fuerzas aplicadas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren alta sensibilidad y alta capacidad de generación de señales. Para caracterizar las propiedades del PZT-5J se diseña un recolector de energía vibratoria a una frecuencia cercana a los 150 Hz que pueda generar la energía suficiente para alimentar un sensor autónomo de llama. Se formula un modelo unidimensional con mejoras que permite predecir los resultados experimentales y numéricos obtenidos mediante un modelo tridimensional de elementos finitos (COMSOL) con el objetivo de predecir la generación de energía del recolector propuesto, cuya compleja geometría dificulta su modelado analítico convencional.

Keywords: Flame detector, Piezoelectric Energy Harvester, PZT-5J.

Abstract. In this work a piezoelectric energy harvester for an autonomous fire-sensing unit is presented. Its design is based on a new PZT-5J piezoelectric material. This variant of piezoelectric ceramic is generally characterized as having a high dielectric constant and a high piezoelectric coefficient. This means that it is capable of generating high output voltages in response to applied forces, making it suitable for applications that require high sensitivity and high signal generation capability. To characterize the properties of the PZT-5J, the design of a new vibration energy harvester that works at a frequency close to 150 Hz and can generate enough energy to feed an autonomous flame sensor is presented. A one-dimensional model with improvements is presented that allows predicting the experimental and numerical results obtained using a three-dimensional finite element model (COMSOL) to predict the power generation of the proposed collector, whose complex geometry makes conventional analytical modeling difficult.

1 INTRODUCCIÓN

El exceso en la utilización de hidrocarburos y su consecuente contaminación medioambiental han suscitado la atención de los científicos hacia fuentes de energía renovables, sostenibles y exentas de contaminantes (Iqbal et al. 2021). Numerosos esfuerzos de investigación se han llevado a cabo utilizando diversas técnicas para aprovechar las fuentes de energías alternativas. Debido al advenimiento de la electrónica de bajo consumo y técnicas mejoradas de micro-fabricación, la recolección de energía se ha convertido en una de las técnicas más generalizadas de extracción de energía. La motivación principal en este campo son los mínimos requisitos de energía de los dispositivos electrónicos (en el rango de los microvatios), como los dispositivos electrónicos portátiles y los nodos de sensores inalámbricos utilizados en aplicaciones de monitoreo. El objetivo de la recolección de energía es alimentar dispositivos electrónicos utilizando fuentes de energía disponibles en el medio ambiente y cuya producción generalmente se desperdicia o su potencial no se considera adecuadamente (Fu et al. 2021). Con el propósito de extraer la energía a partir de las vibraciones ambientales, se han propuesto diversos tipos de recolectores que difieren en su mecanismo de transducción: piezoeléctricos (Guo et al. 2017) electromagnéticos (Khan et al. 2010), electrostáticos (Lu et al. 2016) y triboeléctricos (Shi et al. 2019), los cuales han demostrado ser capaces de brindar la solución adecuada y ser libres de mantenimiento para sistemas portátiles de baja potencia. Entre estos, los recolectores piezoeléctricos se destacan debido a su elevada densidad de potencia, estructura sencilla y capacidad de escalabilidad (Liu et al. 2021). Por lo tanto, la conversión piezoeléctrica ha generado gran interés debido a su implementación sencilla, durabilidad prolongada y buena generación de potencia eléctrica (Pradeesh et al. 2022). Erturk e Inman han efectuado contribuciones esenciales al desarrollar un marco teórico para investigar los recolectores de energía piezoeléctrica (Erturk y Inman, 2009), los cuales han hallado aplicación en una innumerable cantidad de prototipos desde entonces (Ramírez et al. 2019; Shahab et al. 2018).

En lo que se refiere a su uso como alimentación de sensores inalámbricos en máquinas agrícolas, existen pocos antecedentes en la bibliografía, lo cual evidencia su estado novedoso en términos de investigación y desarrollo. En particular, el trabajo de Müller et al. 2010, aborda el problema de identificar las especificaciones requeridas para nodos de sensores inalámbricos (wireless sensor network, WSN) en maquinaria agrícola. El trabajo está enfocado en analizar diversas WSN y sus protocolos de comunicación. Sin embargo, también se presenta un recolector de energía piezoeléctrico en cantiléver, el cual es capaz de generar una potencia promedio de aproximadamente 200 μ W. Febbo et al. (2022) presentaron un trabajo en donde diseñan y fabrican un recolector de energía piezoeléctrico, basado en el uso de un *buzzer*, para alimentar un sensor autónomo e inalámbrico de fuego, instalado sobre una máquina cosechadora. Los resultados obtenidos revelaron que, debido a las grandes aceleraciones generadas por la cosechadora en ciertas ubicaciones, es posible satisfacer la demanda energética necesaria para transmitir los datos del sensor. En este trabajo se utiliza un nuevo material piezoeléctrico para construir recolectores de energía. Su principal ventaja reside en su capacidad para generar energía en comparación con otros piezoeléctricos comúnmente utilizados PZT-5H. De esta manera, se pretende caracterizar las propiedades de un piezoeléctrico PZT-5J mediante el diseño de un nuevo recolector de energía vibratoria que trabaje en una frecuencia cercana a los 150 Hz y con el fin de generar la energía suficiente para alimentar un sensor autónomo de llama. Se presenta un modelo unidimensional con mejoras que permita predecir los resultados experimentales y numéricos obtenidos mediante un modelo tridimensional de elementos finitos (COMSOL) con el objetivo de predecir la generación de energía del recolector propuesto, cuya compleja geometría dificulta su modelado analítico

convencional.

2 DESCRIPCIÓN DEL RECOLECTOR DE ENERGÍA

El modelo de recolección de energía consiste en una viga bi empotrada con una masa ubicada en el centro como se muestra en la [Figura 1](#). La misma consiste principalmente de una lámina piezoeléctrica PZT 5J solidaria a una estructura de acero. Mediante la deformación del material PZT se transforma la energía mecánica en energía eléctrica, la masa puntual incrementa la deformación de la viga y permite la sintonización del dispositivo en condición de resonancia.

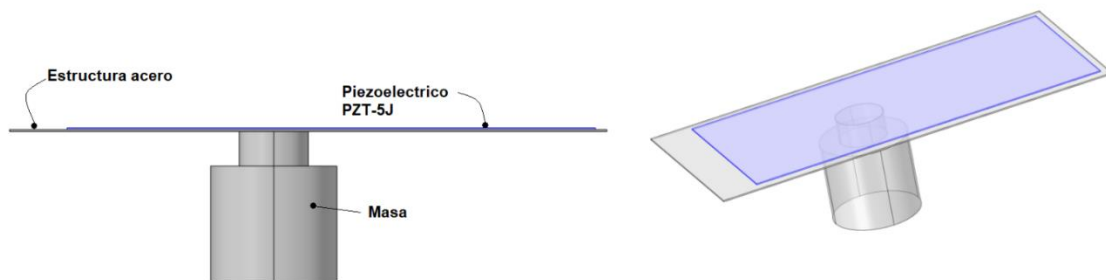


Figura 1: Esquema del sistema de recolección de energía

El modelo matemático del recolector de energía se basa en la teoría de Bernoulli-Euler donde $w(x,t)$ es la deflexión transversal de la viga desde el punto de equilibrio. En cuanto al modelo eléctrico se considera el campo eléctrico lineal y uniforme a través del espesor del piezoeléctrico. En la [Figura 2](#) y en la [Tabla 1](#), se presenta un dibujo esquemático de la lámina piezoeléctrica y las propiedades de la misma, respectivamente. Antes de presentar el modelo matemático del recolector propuesto es necesario caracterizar el material piezoeléctrico PZT-5J, comercializado por la empresa MIDE.

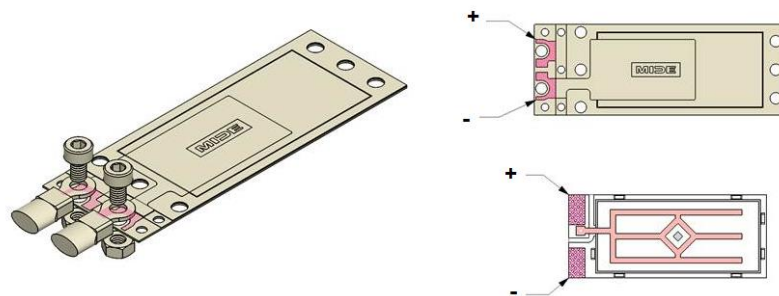


Figura 2: Material piezoeléctrico PZT-5J.

Acero (estructura portante)		Elemento Piezoeléctrico	
Young, E_s	210 GPa	Young, E_p	51 GPa
Densidad, ρ_s	7850 kg/m ³	Densidad, ρ_p	7800 kg/m ³
L_s (largo)	55.4 mm	Piezoelec. d_{31}	-210 pm/V
b_s (ancho)	23.4 mm	Capacitancia	120 nF
h_s (espesor)	0.15 mm	L_p (largo)	46 mm
		b_p (ancho)	20.8 mm
		h_p (espesor)	0.15 mm

Tabla 1: Parámetros geométricos y físicos del material piezoeléctrico.

2.1 Calibración del modelo computacional

Con el propósito de obtener resultados de generación precisos y confiables, se realiza la caracterización del material piezoeléctrico a partir de ensayos experimentales de un viga cantiléver, por ser esta última la configuración más utilizada para realizar una identificación del amortiguamiento estructural y de las constantes piezoeléctricas. Por lo tanto, se coloca el material piezoeléctrico sobre una viga portante de acero, la cual incorpora una masa puntual en el extremo libre M_t . Este modelo ha sido presentado previamente por los autores (Febbo et al. 2022) donde el sistema es excitado por la base mediante la función determinista $g(t)$ que intenta imitar la fuente de excitación de la cual se pretende recolectar energía. Las ecuaciones diferenciales ordinarias de movimiento se pueden obtener mediante el análisis modal convencional (Anton et al. 2007).

$$\begin{aligned} \ddot{q}_j + 2\zeta_j\omega_j\dot{q}_j + \omega_j^2q_j - \theta_jv &= \Gamma_j\ddot{g} \\ C\dot{v} + R^{-1}v + \theta_j\dot{q}_j &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde q_j representa los desplazamientos temporales generalizados y v el voltaje a través del elemento piezoeléctrico. Además, R es la resistencia de la carga, C la capacidad del piezoeléctrico, ζ_j el amortiguamiento modal asociado, ω_j frecuencia natural del sistema, θ_j el acoplamiento electromecánico y Γ_j el acoplamiento modal. La viga es discretizada en dos tramos para considerar el cambio seccional introducido por el material piezoeléctrico. Aplicando el método de balance armónico a las Ecs. (1) se obtiene la siguiente expresión para el voltaje (Febbo et al. 2022):

$$V = \frac{\Gamma_j\theta_jR\Omega}{\sqrt{(\omega_j^2 - \Omega^2 - 2CR\zeta_j\omega_j\Omega^2)^2 + [2\Omega\omega_j\zeta_j + R\Omega(\theta_j^2 + C\omega_j^2 - C\Omega^2)]^2}} \quad (2)$$

La respuesta dinámica de generación de voltaje obtenida con el modelo matemático unidimensional Ec. (2) es comparada con los resultados obtenidos experimentalmente. En los ensayos experimentales la viga cantiléver se somete a diferentes condiciones de excitación para determinar su respuesta en resonancia. La viga es montada sobre un *shaker* Labworks ET-132, cuya aceleración es generada a través de un generador Rigol DG 4062 y luego amplificada. La respuesta es medida por un acelerómetro PCB Piezotronics con una sensibilidad de 98.7 mV/g. La señal de salida es adquirida por una placa NI 9234 y postprocesada mediante un código en Matlab (ver Figura 3). En los ensayos se realiza un barrido en frecuencia con una señal senoidal, registrando el voltaje en función de la aceleración de la base (en unidades de $g = 9.80 \text{ m/s}^2$). El rango de frecuencias es de 85 a 110 Hz, para observar el pico de generación del primer modo flexional en 100 Hz, con una resistencia de carga de 326 k Ω . Las dimensiones de la viga de acero portante son: largo 71 mm, ancho 24.6 mm, espesor 7 mm y la masa ubicada en el extremo libre es de 2.84 gr.

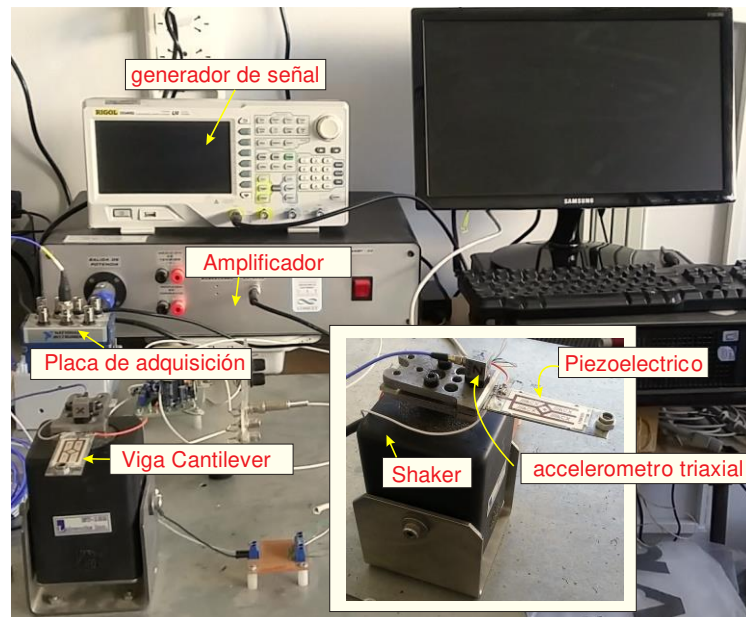


Figura 3: Esquema de ensayo experimental de la viga cantiléver con el piezoeléctrico.

En la Figura 4 se muestra la respuesta en frecuencia de generación de voltaje correspondiente a los valores experimentales y los valores numéricos del modelo analítico Ec. (2). El valor de amortiguamiento modal ζ es determinado por medio del modelo tipo viga unidimensional ajustando a la amplitud de generación de voltaje en resonancia, el cual resulta ser de $\zeta = 0,005$. A partir de la buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales se procede al desarrollo de un modelo numérico tridimensional (3D), utilizando software COMSOL Multiphysics. El amortiguamiento modal identificado en el paso anterior es considerado en el modelo 3D utilizando modelo de amortiguamiento proporcional de Rayleigh, definiendo una combinación lineal de las matrices de masa y rigidez de la siguiente forma:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (3)$$

Los coeficientes α y β se calculan mediante la siguiente expresión (He and Fu 2001):

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2\omega_0} & \frac{\omega_0}{2} \\ \frac{1}{2\omega_1} & \frac{\omega_1}{2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \zeta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (4)$$

siendo ω_0 y ω_1 las frecuencias naturales no amortiguadas del primer y segundo modo. De esta manera, en función de los valores de frecuencias calculados $\omega_0 = 628$ (100 Hz) y $\omega_1 = 3956$ (630 Hz), los valores introducidos en COMSOL son $\alpha = 5.42$ y $\beta = 2.18 \cdot 10^{-6}$.

En la Figura 4 se muestra la respuesta en frecuencia obtenida con el modelo 3D de COMSOL, donde se observa una buena predicción de generación de energía del modelo 3D, tanto en la condición de resonancia como fuera de ella. En el caso del modelo tridimensional, el material piezoeléctrico es ortótropo y es necesario definir las matrices para considerar las propiedades eléctricas y mecánicas del mismo. Por lo tanto, la selección de los coeficientes que conforman la matriz de permitividad relativa $\boldsymbol{\varepsilon}^s$ (o constante dieléctrica), la matriz de rigidez \mathbf{C}^E (definida a campo eléctrico constante) y la matriz de acoplamiento electromecánico $\mathbf{e} = \mathbf{d} \mathbf{C}^E$, corresponden a valores conocidos para el material PZT 5J.

$$\varepsilon^s = \begin{bmatrix} 2140 & 0 & 0 \\ 0 & 2140 & 0 \\ 0 & 0 & 1143 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C^E = \begin{bmatrix} 8.23 & 3.40 & 3.02 & 0 & 0 & 0 \\ 3.40 & 8.23 & 3.02 & 0 & 0 & 0 \\ 3.02 & 3.02 & 5.98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.41 \end{bmatrix} [10^{10} Pa] \quad (4)$$

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 14.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14.25 & 0 & 0 \\ -10.48 & -10.48 & 16.57 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left[\frac{C}{m^2} \right] \quad (5)$$

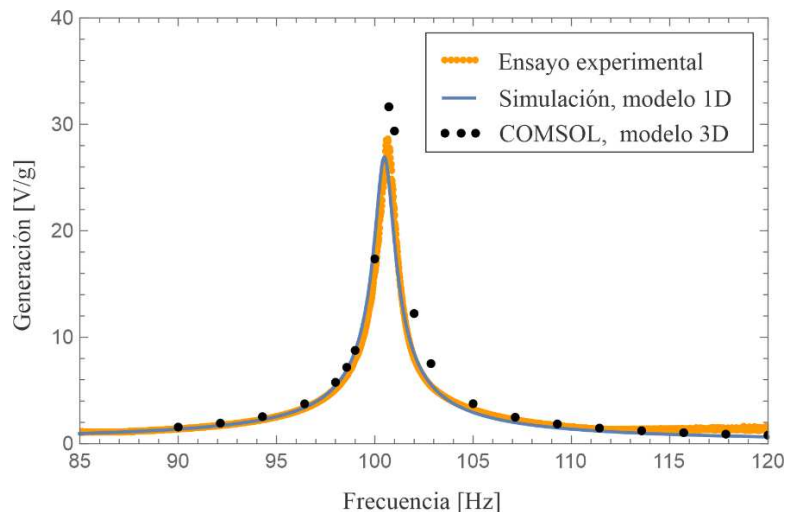


Figura 4: Respuesta en frecuencia de voltaje del modelo viga, $R = 326 \text{ k}\Omega$.

2.2 Recolector propuesto

A partir de la calibración realizada se simula la generación de voltaje para el dispositivo ilustrado en la [Figura 1](#). La idea en este punto es desarrollar un modelo matemático unidimensional (1D) que sea preciso a la hora de predecir la generación de energía. El problema con el modelo unidimensional tipo viga radica en la masa concentrada en la mitad del material piezoeléctrico. A la hora de pensar en la deformación de la lámina piezoeléctrica, es claro que la masa central puede introducir cierta rigidez que influya en la generación de voltaje. De esta manera, se plantean dos modelos tipo viga:

Modelo 1: considerando a la masa como una condición puntual, ver [Figura 5a](#).

Modelo 2: considerando el cambio de rigidez introducido por la masa, ver [Figura 5b](#).

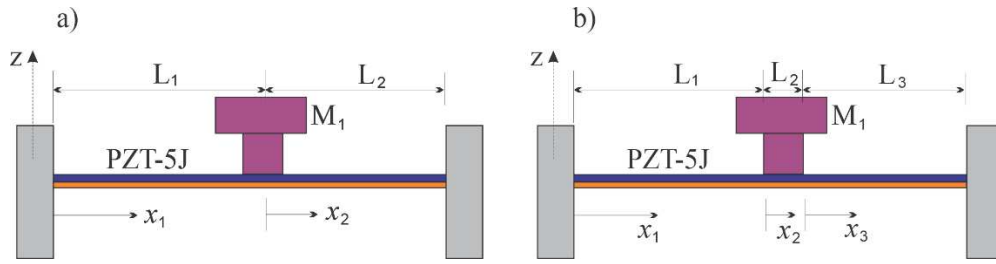


Figura 5: Recolector de energía propuesto basado en a) modelo 1 y b) modelo 2.

La viga se modela utilizando la teoría de Bernoulli-Euler donde la discretización espacial del desplazamiento transversal $w(x,t)$ de la viga es representada como una suma finita de N desplazamientos temporales generalizados $q_i(t)$ y funciones de forma modal $\phi_i(x)$:

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(x) q_i(t) \tag{6}$$

Para considerar la masa puntual en el modelo 1 y el cambio geométrico, se propone un sistema discontinuo para definir la función de forma $\phi_i(x)$:

$$\phi_i(x) = \sum_{n=1}^3 \phi_{i,n}(x) H_n(x) \tag{7}$$

donde n es el número de secciones y $H_n(x)$ es la función de Heaviside. Dependiendo del modelo considerado, las funciones de forma pueden ser dos o tres. Por ejemplo, cuando el dispositivo es discretizado según el modelo 1, el sistema se considera como un continuo formado por dos tramos. Mientras que para el modelo 2, el sistema se considera como un continuo formado por tres tramos.

$$\begin{aligned} \phi_{i,1}(x_1) &= C_1 \sin(\beta_{i,1}x_1) + C_2 \cos(\beta_{i,1}x_1) + C_3 \sinh(\beta_{i,1}x_1) + C_4 \cosh(\beta_{i,1}x_1), \\ \phi_{i,2}(x_2) &= C_5 \sin(\beta_{i,2}x_2) + C_6 \cos(\beta_{i,2}x_2) + C_7 \sinh(\beta_{i,2}x_2) + C_8 \cosh(\beta_{i,2}x_2), \\ \phi_{i,3}(x_3) &= C_9 \sin(\beta_{i,3}x_3) + C_{10} \cos(\beta_{i,3}x_3) + C_{11} \sinh(\beta_{i,3}x_3) + C_{12} \cosh(\beta_{i,3}x_3), \end{aligned} \tag{8}$$

$$\beta_{i,1} = \left(\frac{\omega_i^2 \rho A_1}{EI_1} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad \beta_{i,2} = \left(\frac{\omega_i^2 \rho A_2}{EI_2} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad \beta_{i,3} = \left(\frac{\omega_i^2 \rho A_3}{EI_3} \right)^{\frac{1}{4}},$$

donde C_j ($j = 1- 12$) son constantes que se obtienen de las condiciones de borde. En el caso del modelo 1, intervienen dos tramos con 8 constantes de integración y las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \phi_{i,1}(0) &= 0, \quad \phi'_{i,1}(0) = 0, \\ \phi_{i,1}(L_1) &= \phi_{i,2}(0), \quad \phi'_{i,1}(L_1) = \phi'_{i,2}(0), \\ EI_1 \phi''_{i,1}(L_1) &= EI_2 \phi''_{i,2}(0) + I_{T1} \omega^2 \phi'_{i,1}(L_1), \quad EI_1 \phi'''_{i,1}(L_1) = EI_2 \phi'''_{i,2}(0) - M_1 \omega^2 \phi_{i,1}(L_1), \\ \phi_{i,2}(L_2) &= 0, \quad \phi'_{i,2}(L_2) = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Donde I_{T1} es el momento de inercia de la masa. En el caso del modelo 2, las 12 constantes de integración surgen de plantear las 4 condiciones de borde y 8 de compatibilidad. Luego se realiza la normalización de los modos con respecto a la masa. Para el caso del modelo 1:

$$\rho A_1 \int_0^{L_1} \phi_{j,1}(x) \phi_{n,1}(x) dx + \rho A_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} \phi_{j,2}(x) \phi_{n,2}(x) dx + \phi_{j,1}(L_1) M_1 \phi_{n,1}(L_1) + I_{T1} \phi'_{j,1}(L_1) \phi'_{n,1}(L_1) = \begin{cases} 0 & \text{for } j \neq n \\ 1 & \text{for } j = n \end{cases} \tag{9}$$

Para el caso del modelo 2:

$$\rho A_1 \int_0^{L_1} \phi_{j,1}(x) \phi_{n,1}(x) dx + \rho A_2 \int_{L_1}^{L_1+L_2} \phi_{j,2}(x) \phi_{n,2}(x) dx + \rho A_3 \int_{L_1+L_2}^{L_1+L_2+L_3} \phi_{j,3}(x) \phi_{n,3}(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{for } j \neq n \\ 1 & \text{for } j = n \end{cases} \quad (11)$$

La diferencia entre ambos modelos radica en la obtención del acoplamiento electromecánico debido a que está asociado a la deformación de la viga. La predicción de generación de energía depende principalmente de este parámetro que se define de la siguiente manera:

$$\theta_j = \frac{l}{2} d_{31} E_p b_p (2a + h_p) \int_0^{L_p} \phi_{j,1}''(x) dx \quad (12)$$

3 RESULTADOS

3.1 Recolector propuesto

El recolector presentado en la [Figura 1](#) consiste en empotrar la lámina piezoeléctrica y colocarle una masa en el centro para sintonizarlo en una frecuencia entre 145 y 155 Hz con el fin de generar la energía suficiente para alimentar un sensor autónomo de llama. La frecuencia natural flexional de la lámina piezoeléctrica en la condición bi-empotrada es de 300 Hz. Por lo tanto, con la ayuda de los modelos matemáticos 1D se procede a dimensionar la masa necesaria para reducir la frecuencia. De esta manera, se adosa una masa especialmente diseñada de 8 gr ubicada en el centro de la lámina como se muestra en la [Figura 5](#), la cual permite sintonizar el dispositivo en una frecuencia cercana a 150 Hz y a su vez incrementar la deformación en el material piezoeléctrico, aumentando la generación de energía. La masa tiene un diámetro de base de 8 mm con una altura de 9 mm y un diámetro en la parte superior de 12 mm con una altura de 5 mm. Un modelo 3D es desarrollado en COMSOL y en la [Figura 6a](#) se observa el modo de vibración flexional representado por la lámina piezoeléctrica restringida en sus dos extremos. A su vez, en la [Figura 6b](#) se muestra la amplitud modal obtenida con la formulación 1D, comparando la forma del modo que surge del modelo 1 y 2. En la [Figura 6b](#) se puede observar la diferencia entre los modos obtenidos analíticamente. En el caso del modelo 2, se aprecia el cambio de rigidez introducido por la masa en el centro de la viga. El cambio en la forma del modo puede afectar el valor del parámetro de acoplamiento piezoeléctrico calculado mediante la Ec. (12). Dicho parámetro actúa directamente sobre la generación de energía. En la Ec. (1) se observa que es directamente proporcional al voltaje generado.

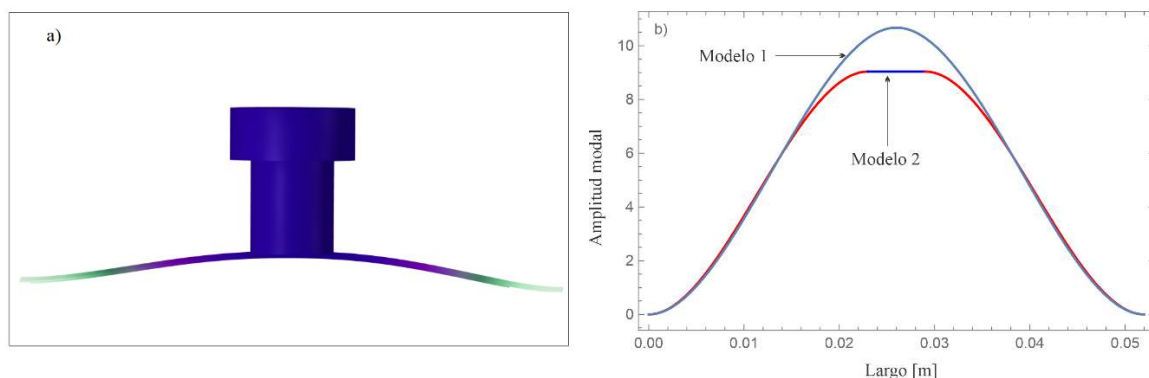


Figura 6: Modo de vibración sintonizado a 150 Hz, a) Modelo COMSOL, b) modelo 1 y 2 viga.

La generación de voltaje se realiza mediante un barrido en frecuencia, registrando el voltaje en función de la aceleración de la base (en unidades de $g = 9.80 \text{ m/s}^2$). El rango de frecuencias es de 140 a 160 Hz, para observar el pico de generación del primer modo flexional cercano a 150

Hz. La resistencia de carga es de $2\text{ k}\Omega$ de forma de simular en forma aproximada, la impedancia de una unidad de sensado de llama. En la Figura 7 se muestra la respuesta en frecuencia de generación de voltaje obtenida con el modelo 3D y con los modelos 1D. Se observa un pico de voltaje de 8 volts para una aceleración de 1 g obtenida mediante el modelo 3D, mientras que la predicción analítica correspondiente al modelo 2 arroja valores similares y ligeramente inferior para la condición resonante. La curva en rojo que representa los voltajes obtenidos con el modelo analítico 1 es considerablemente menor y se debe principalmente a la forma del modo propuesta.

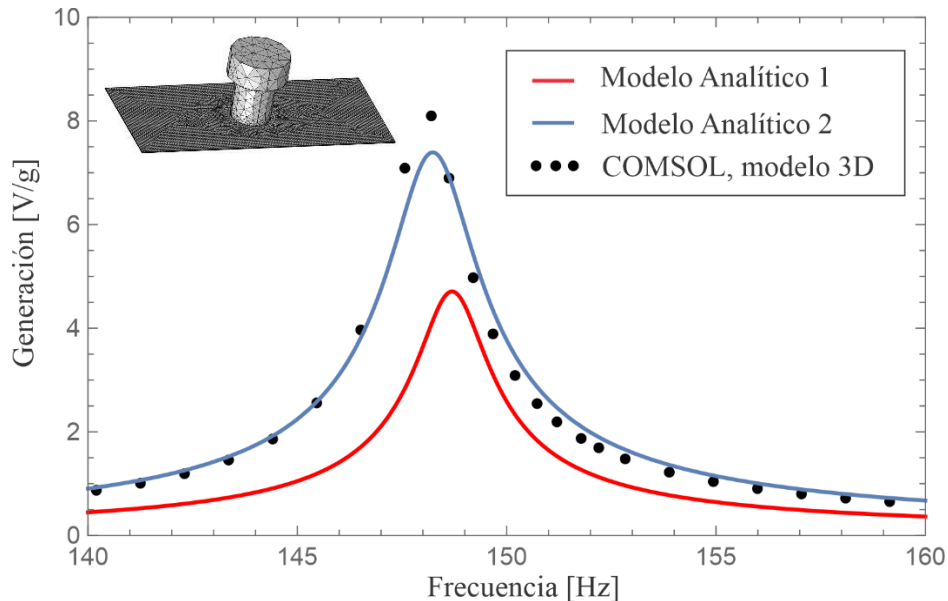


Figura 7: Respuesta en frecuencia de voltaje de los modelo analíticos 1D y 3D de COMSOL, $R = 2\text{ k}\Omega$.

A partir de los resultados obtenidos, se construye el prototipo del recolector de energía sabiendo que la energía generada puede ser suficiente para actuar como fuente de alimentación de un sensor de llama. Mediante mediciones de laboratorio se establecieron los requisitos eléctricos mínimos de la placa de sensado y transmisión de datos, siendo de 4 Volts y 0.5 mA de corriente sobre la unidad de regulación y rectificación de potencia (Febbo et al. 2022). En los ensayos experimentales se sometió al recolector de energía a una vibración medida sobre una cosechadora y se registró que luego de 30 minutos de operación la unidad de sensado presentaba un incremento en la energía almacenada en el supercapacitor, demostrando que la generación de voltaje es suficiente para alimentar el circuito de sensado.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un dispositivo recolector de energía basado en un nuevo material piezoeléctrico PZT-5J. Para la verificación del modelo analítico unidimensional tipo viga se colocó al material piezoeléctrico sobre una viga de acero en condición cantiléver y sintonizada a 100 Hz. De esta manera, se compararon los resultados con un modelo 3D de COMSOL y con ensayos experimentales, obteniendo una muy buena correlación entre ellos. Con el fin de diseñar un dispositivo que sirva para alimentar eléctricamente un sensor autónomo de llama, el recolector se diseña resonante en base a las frecuencias de la fuente de vibración de entre 150 y 160 Hz. El dispositivo propuesto tiene la ventaja de ser de tamaño reducido, no debe pegarse a la estructura de base y tiene una generación del mismo orden de magnitud, comparado con una viga cantiléver. Se proponen dos modelos analíticos unidimensionales para predecir la generación de voltaje. Uno considerando la masa como un elemento puntual ubicada en el

centro de la viga bi-empotrada, mientras que el segundo modelo considera el cambio de rigidez debido a la masa. El modo de vibración del segundo modelo 1D presenta una mejor concordancia con el modelo 3D, lo cual impacta sobre el coeficiente electromecánico del generador. La generación de energía de ambos modelos es comparada con los resultados obtenidos con un modelo 3D de COMSOL, registrando una muy buena concordancia de voltaje del segundo modelo 1D para una aceleración de $1g$ y una carga de $2\text{ k}\Omega$. Al observar la capacidad de generar energía del recolector propuesto se concluye que, en función de sus características eléctricas, voltaje y corriente requeridos para su normal funcionamiento, el dispositivo propuesto tiene una generación eléctrica suficiente para la alimentación de la unidad de monitoreo de llama.

REFERENCIAS

- Anton SR, Sodano HA. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Materials and Structures*; 16, 2007. doi:10.1088/0964-1726/16/3/R01.
- Erturk A, Inman DJ. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures* ;18:025009, 2009.
- Iqbal M, Nauman MM, Khan FU, Abas PE, Cheok Q, Iqbal A, Aissa B. Vibration-based piezoelectric, electromagnetic, and hybrid energy harvesters for microsystems applications: a contributed review, *Int J Energy Res.* 45 (2021); 65–102.
- Febbo M, Machado SP. Recolector piezoeléctrico para unidad de sensado autónomo de fuego, MECOM 2022, págs. 871-880 1-4 Noviembre, Bahía Blanca, Argentina.
- Fu H, Mei X, Yurchenko D, Zhou S, Theodossiades S, Nakano K, Yeatman EM. Rotational energy harvesting for self-powered sensing, *Joule* 5 (5) (2021).
- Guo L, Lu Q. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. *Renew Sustain Energy Rev.*72 (2017):761-773.
- He J, Fu Z-F. *Modal Analysis*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- Khan F, Sassani F, Stoeber B. Copper foil-type vibration-based electromagnetic energy harvester. *J Micromech Microeng.* 20 (2010):125006.
- Liu L, Guo X, Lee Ch. Promoting smart cities into the 5G era with multi-field Internet of Things (IoT) applications powered with advanced mechanical energy harvesters, *Nano Energy* 88 (2021) 106304.
- Lu Y, O'Riordan E, Cottone F, et al. A batch-fabricated electret-biased wideband MEMS vibration energy harvester with frequency-up conversion behavior powering a UHF wireless sensor node. *J Micromech Microeng.* 26 (2016): 124004.
- Mori K, Horibe T, Ishikawa S, Shindo Y, Narita F. Characteristics of vibration energy harvesting using giant magnetostrictive cantilevers with resonant tuning. *Smart Materials and Structures*;24, 2015. doi:10.1088/0964-1726/24/12/125032.
- Muller G., Rittenschober Th., Springer A. A wireless sensor network using energy harvesting for agricultural machinery, *Elektrotechnik & Informationstechnik* 127/3 (2010): 39–46.
- Pradeesh EL, Udhayakumar S, Vasundhara MG, Klavathi GK, A review on piezoelectric energy harvesting. *Microsystem Technologies*, 28 (8) 1797-1830, 2022.
- Ramírez JM, Gatti CD, Machado SP, Febbo M. A piezoelectric energy harvester for rotating environment using a linked E-shape multi-beam. *Extreme Mechanics Letters* ; 27, 8-19, 2019.
- Shahab S, Zhao S, Erturk A. Soft and hard piezoelectric ceramics and single crystals for random vibration energy harvesting. *Energy Technology* ; 6 (5), 935-942, 2018.
- Shi Q, Qiu C, He T, et al. Triboelectric single-electrode-output control interface using patterned grid electrode. *Nano Energy.* 60 (2019):545-556.